

## 석유/천연가스 매장량의 분류 및 평가방법

임종세 · 김지영

한국해양대학교 해양개발공학부

### Oil and Gas Reserves Classification System and Estimation Methods

Jong-Se Lim and Ji-Yeong Kim

Div. of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University

**Abstract:** It is essential for future planning that governments and industry have a clear assessment of the quantities of petroleum available for production and quantities which are anticipated to become available within a practical time frame through additional field development, technological advances, or exploration. This paper describes the petroleum reserves classification and estimating methods based on the SPE/WPC (1997) definition. Reserves are those quantities of petroleum which are anticipated to be commercially recovered from known accumulations from a given date forward. Reserve estimating methods usually are categorized into analogy, volumetric and performance techniques. The performance techniques are subdivided into simulation studies, material balance calculations, and decline trend analysis. Reserve can be estimated using either deterministic or probabilistic methods. This paper can be helpful to understand petroleum reserve estimation and evaluate the reserves in oil & gas development projects properly.

**Key words:** petroleum, resources, reserves, estimating methods

### 서 론

석유(petroleum)란 온도와 압력조건에 따라 액체 또는 기체상태로 존재하는 자연발생적 탄화수소(hydrocarbon) 혼합물을 의미한다. 일반적으로 지하에 석유/천연가스가 유/가스전으로서 성립되기 위해서는 근원암, 저류암, 집유구조와 덮개암이 필수적으로 존재하여야 하는 등 유/가스전 성립은 여러 가지 조건을 동시에 만족해야 하므로 지구상에 이 조건을 구비하고 있는 장소는 한정되어 있어 석유와 천연가스의 지역적인 편재를 가져오게 하는 원인이 된다.

석유는 세계 에너지원에 있어 중요한 위치를 차지하고 있으며 세계 경제의 지속적 발전을 위해서 필수 불가결한 요소이다. 따라서 현재 생산 가능한 석유/천연가스의 양과 미래에 생산가

능한 양을 정확히 평가하는 것은 매우 중요하다.

이러한 석유/천연가스 매장량 평가에 있어 적용할 수 있는 용어와 평가기준의 통일화를 위한 노력들이 미국을 중심으로 진행되어 왔으며, 1997년 SPE(Society of Petroleum Engineers)와 WPC(World Petroleum Congresses) 공동으로 석유 자원량 및 매장량에 대한 기준을 승인하여 통일된 매장량 기준과 평가방법을 마련하는 계기가 되었다.

이 논문에서는 SPE/WPC에서 승인한 내용을 토대로 현재까지 국내외 문헌들을 통해 제시된 분류체계 및 평가방법 등을 정리 하고자 한다. 석유/천연가스 매장량 및 평가방법의 정확한 이해는 국내 석유개발업계의 사업 참여시 광구에 대한 사업성 평가 및 계획 수립에 활용될 수 있을 것이다

## 석유 자원량 및 매장량의 정의

### 석유 자원량(resources)

원시부존량이라 평가되는 석유의 모든 양을 말하며, 총원시부존량(Total-petroleum-initially-in-place)이라 정의하기도 한다.

석유 자원량은 시추를 통한 석유자원의 존재 확인여부에 따라 발견원시부존량과 미발견원시부존량으로 구분하며 회수가능성 여부에 따라 발견원시부존량의 경우 매장량(reserves)과 잠재자원량으로 구분되며 미발견원시부존량의 경우에는 기대자원량(prospective resources)으로 구체화한다. Fig. 1은 석유 자원량의 분류체계를 도표로 나타낸 것이다.

#### ① 발견원시부존량

(Discovered petroleum-initially-in-place)

시추를 통해 저류층의 존재가 확인되었고, 파악된 집적구조에 포함되어 있는 양과 그곳으로부터 이미 생산된 모든 석유의 양을 통틀어 말하며, 상업적인 회수가능성에 따라 매장량과 잠재자원량으로 분류한다.

매장량이란 파악된 집적구조로부터 상업적

회수가 가능한 석유자원의 양으로, 평가의 확실성 정도에 따라 확인, 추정, 가능 매장량으로 구분한다.

잠재자원량은 파악된 집적구조로부터 잠재적으로는 회수가능 하지만, 현재시점에서 상업적 회수가 불가능하다고 파악되는 양이다. 그러나, 만약 시장이 형성되고 기술이 발달하는 등 여러 조건이 충족되어지면 상업적 회수가 가능하게 되어 매장량 범주에 포함될 수 있는 자원량을 말한다.

#### ② 미발견원시부존량

(Undiscovered petroleum-initially-in-place)

시추를 통해 아직 발견되지는 않았지만 집적구조로부터 평가된 석유 자원량이다. 미발견원시부존량의 범주에 포함되는 기대자원량은 시추를 통해 확인되지는 않았지만, 석유가 있을 것으로 추정되는 유망구조에서 만약시추를 통해 발견이 되고 생산에 대한 경제성까지도 확인이 된다면 매장량으로 분류할 수 있는 자원량이다.

기대자원량은 현재시점의 불확실성에 따라 최소, 적정, 최대 기대 매장량으로 구분한다.

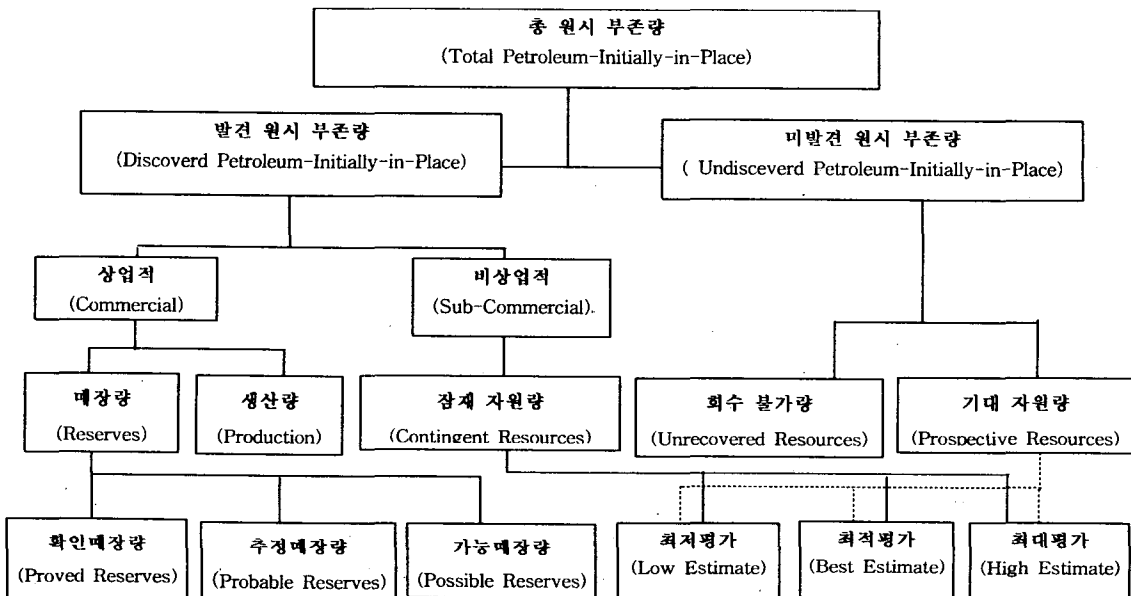


Fig. 1. Petroleum Resources Classification

**석유 매장량(Reserves)**

매장량은 파악된 집적구조로부터 현시점에서 상업적 회수가 가능할 것으로 기대되는 석유 자원량이다. 매장량을 평가하는데 있어 신뢰할 만한 지질학적·공학적 자료의 양에 크게 영향을 받는 불확실성이 어느 정도 포함되는데, 이 불확실성 정도에 따라 확인매장량(Proved reserves)과 미확인매장량(Unproved reserves)으로 분류한다. 미확인매장량은 확인매장량보다 회수될 가능성이 적은 경우이며, 추정매장량(Probable reserves)과 가능매장량(Possible reserves)으로 다시 분류한다.

매장량 평가는 개발 및 생산이 이루어짐에 따라 얻어진 충분한 지질학적·공학적 자료와 현재 경제 조건, 그리고 증진회수법(Improved recovery method)등의 영향을 받아 계속 변경되어 질 수 있다. Table 1은 석유 매장량의 분류체계를 나타낸 것이다.

Table 1. Reserves Classification System

구분	확인(Proved) 매장량		추정(Probable) 매장량	가능(Possible) 매장량
	개발(Developed) 생산	미개발(Undeveloped) 미생산		
일반적 정의	· 현재의 경제적조건, 운영방법, 국가의 법체계 하에서 회수가능성에 대해 타당하고 확실한 예측이 가능한 평가량		회수가 안된 가능성보다 될 가능성이 큰 평가량	개발 여부에 대한 확실성 조사 부족한 평가량
경제적 기준	· 평가시점에 있어서의 가격, 비용 등 현재의 경제적 조건		현재 또는 미래의 평가된 경제적 조건	현재 또는 미래의 평가된 경제적 조건
운영 및 설비	· 처리 및 운반에 필요한 설비가 운영중이거나, 이러한 설비의 설치에 대한 합의 또는 확실한 기대가 가능			
상업적 생산성	· 실제 생산 또는 생산시험을 통해 상업적 생산가능성이 증명된 매장량 · 검출 및 코어 자료로부터 탄화수소의 무른이 확인되었거나 생산성이 확인된 저류층과 지질학적 으로 연결된 곳에 포함되는 매장량		검출 자료의 분석결과 생산성이 확인 매장량과 동일 하지 않은경우	탄화수소는 있어 보이나, 상업적 수준에 못미칠 수도 있는 경우

① 확인매장량(Proved Reserves)

파악된 저류층의 상태와 현재 경제조건, 운영방법과 정부의 규제 하에서 상업적으로 회수가 가능하다고 평가되는 확실성(certainty)이 큰 석유의 양을 말하며, 확인매장량은 회수할 수 있는 타당한 확실성을 가지고 있어야 한다.

확인매장량을 만족시키는 확실성은 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 평가된다, 결정론적 방법을 사용할 경우에 확실성은 석유가 회수될 수 있는 높은 신뢰도를 나타내고, 확률론적 방법이 사용될 경우에는 실제 회수될 석유의 양이 평가된 양과 같거나 이를 초과할 가능성이 적어도 90%(P90)이상이 됨을 나타낸다.

저류층과 유정의 개발·생산상태에 따라 확인매장량은 다시 개발매장량과 미개발매장량으로 세분화할 수 있다.

㉠ 개발매장량(Developed Reserves)

현존하는 유정으로부터 회수가 기대되는 매장량으로, 회수하기 위한 장치가 설치되거나 이에 따른 설치비용이 상대적으로 감소하고 난 후 개발된 양을 말한다. 개발매장량은 생산중(producing)인 것과 미생산(non-producing)인 것으로 다시 구분되는데, 생산중인 양은 평가 당시 생산중이거나 완결구간이 열려있어서 회수 가능하다고 기대되는 매장량을 말한다. 반면 미생산인 것은 유정이 닫혀 있거나 기계적인 문제로 생산이 중단되었거나 완결구간이 열려 있기는 하지만 생산단계까지 가지 못한 매장량을 말한다.

㉡ 미개발매장량(Undeveloped Reserves)

시추되지 않은 곳에서 회수가 기대되거나 현재 생산중인 저류층으로부터 더 깊은 심부의 저류층으로 추가적인 시추가 요구되거나 생산 및 운반, 설치비에 많은 비용이 소모되는 경우 등이 이에 해당한다.

② 미확인매장량(Unproved Reserves)

확인매장량과 유사한 지질학적·공학적 자료를 토대로 분석·평가한 결과, 현재시점에서의 경제적·법적·기계적요인으로 인해 회수가 불가능하다고 판단된 매장량으로, 추정매장량과 가능매장량으로 구분된다. 그러나 만약 가까운 미래에 경제적 상황이 호전되고 기술개발이 이뤄진다면 확인매장량으로 분류될 수도 있다.

㉠ 추정매장량(Probable Reserves)

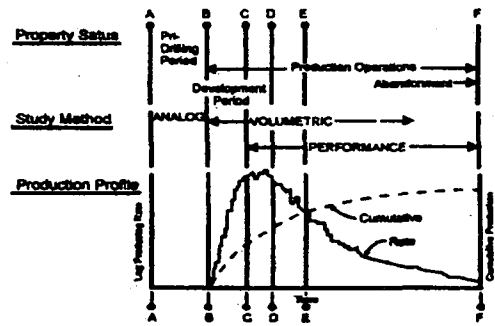
지질학적·공학적 자료의 분석 결과 회수될 가능성이 그렇지 않을 가능성보다 큰 평가량이다. 확률론적 방법을 사용하면 실제 회수될 석유의 양이 확인매장량과 추정매장량의 합과 같거나 이를 초과할 가능성이 50%(P50) 이상인 것으로 나타난다. 구체적으로 추정매장량에 속하는 것은 다음과 같다.

- 확인매장량으로 분류 되기에는 부족한 매장량
- 검증자료에 의해 생산성은 확인되었지만 코아자료가 부족한 경우 또는 생산중이거나 확인된 저류층과 연결되지 못한 경우의 매장량
- 평가 당시의 유정 간격보다 좁게 추가시추를 실행함으로써 얻어질 수 있는 매장량
- 상업적으로 가능한 증진회수법으로 추가할 수 있는 매장량
- 지질학적 해석 또는 단층으로 인해 확인매장량과 분리되어 있거나 상부에 위치한 매장량
- 생산추이분석법이나 용적 자료의 재해석으로 확인매장량에서 추가적으로 확인된 매장량

- 기술적으로 불확실한 추가시추를 함으로써 얻을 수 있는 매장량
- 상업적으로 생산가능성이 확실하지 않은 증진회수법으로 획득할 수 있는 매장량
- 단층이나 지질학적 해석으로 확인매장량과 분리되어 있으며 그 하부에 위치한 매장량

석유 매장량 계산법

석유의 매장량을 산출하는 방법으로는 유추계산법, 용적법, 생산추이 분석법 등이 있다.



㉡ 가능매장량(Possible Reserves)

지질학적·공학적 자료 분석을 토대로 추정매장량보다 적게 회수되는 매장량이다. 확률론적 방법으로 평가한다면 실제 회수될 양이 확인매장량과 추정매장량, 가능매장량의 총합과 같거나 이를 초과할 가능성이 적어도 10%(P10) 이상인 경우이다. 가능매장량에 포함되는 매장량은 다음과 같다.

- 지질학적 해석을 기초로 하여, 추정매장량으로 분류된 지역 외부에 존재 가능성이 보이는 매장량.
- 코아와 검증자료분석을 통해 석유는 포함하고 있지만 경제적인 면에서는 생산이 희박한 매장량

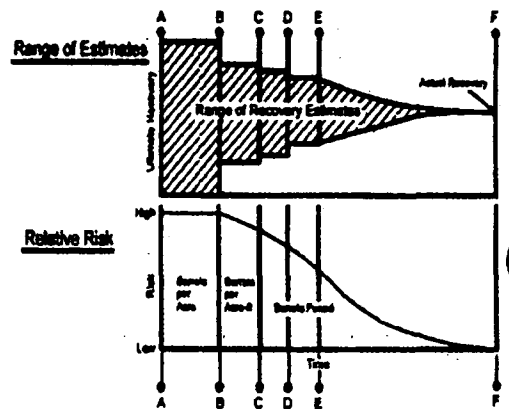


Fig. 2. Range in estimates of ultimate recovery during the life of a reservoir

Fig. 2는 생산과정에 따른 석유 매장량 산출방법을 나타낸 것이다. A-B구간은 시추하기 전의 구간으로 유추계산법이 쓰이며 회수량의 범위가 가장 크고 위험도(risk) 역시 가장 높은 구간이다. B-C구간은 시추를 시작하는 구간으로, 이때부터는 용적법이 사용가능하며 유추계산법에 의한 회수평가보다 비교적 정확한 값을 갖게 된다. C-F구간은 계속되는 개발로 인해 충분한 저류층 정보를 얻을 수 있으므로 이 때부터는 생산추이 분석법이 사용된다. 최종적으로 개발 마지막 단계에서는 위험도가 최소가 되어 하나의 궁극회수율을 얻을 수 있다.

**유추계산법(Analogy)**

저류층에 시추가 이루어지기 전 생산추이가 아직 파악되지 못한 경우 기대되는 매장량을 평가하는 방법이다. 대상 저류층으로부터 생산 자료가 없기 때문에 대상 저류층에서 예측되는 특징과 유사한 다른 저류층의 생산자료를 통계 자료로 사용한다. 이런 이유로 유추계산법으로 평가된 매장량은 가장 낮은 신뢰성을 가지며, 최소·최대값의 범위를 제시하는 정도의 기준만 제시해 줄 수 있기 때문에 정확한 값을 기대하기는 어렵다.

**용적법(Volumetric Method)**

시추작업 후에 얻은 저류층의 특성변수를 통해 지질학적 분석을 수행할 수 있다. 용적법을 이용한 계산에 사용되는 저류층의 특성변수들은 확정값 또는 확률분포를 사용하여 얻을 수 있는데, 확정값을 사용하여 평가하는 방법을 결정론적 방법이라 하고, 확률분포를 이용 평가하는 것을 확률론적 방법이라 한다.

용적법에 의해 계산된 값은 원시 부존량이며 매장량 계산을 위해서는 회수율 추정이 이루어져야 한다. 부존량으로부터 회수되는 양은 압력 또는 시간의 함수이며, 회수율을 결정하기 위해서는 저류층의 생산기능을 파악해야 한다.

용적법에 의한 계산식은 저류층 상태에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 자유가스 및 가스캡 가스 (Free Gas & Gas-Cap Gas)

$$G = \frac{43,560 V_g \phi (1 - S_w) p T_s}{z T p_s} \quad (1)$$

여기서,

- $G$  = 원시 자유가스부존량[scf]
- $V_g$  = 가스포함 지층의 체적[acre-ft]
- $\phi$  = 공극률
- $S_w$  = 물의 포화도
- $p_s$  = 표준 압력[psia]
- $T$  = 저류층 온도, 절대온도[°R]
- $T_s$  = 표준 온도, 절대온도[°R]
- $z$  = 가스의 압축지수

- 저류층내 석유(Oil in the Reservoir)

$$N = \frac{7,758 V_o \phi (1 - S_w)}{B_o} \quad (2)$$

여기서,

- $N$  = 원시 석유매장량(stb)
- $V_o$  = 석유함유 지층의 체적(acre-ft)
- $B_o$  = 석유용적계수(rb/stb)

- 석유 저류층내 용해가스 (Solution Gas in an Oil Reservoir)

$$G_s = \frac{7,758 V_o \phi (1 - S_w) R_s}{B_o} \quad (3)$$

여기서,

- $R_s$  = 용해가스와 석유의비(scf/stb)
- $G_s$  = 용해가스량(scf)

**생산추이 분석법(Performance Techniques)**

개발이 진행되어 저류층 변수들에 대한 평가가 충분히 이루어지면, 물질평형법 또는 저류층 시뮬레이션의 적용이 가능해지며, 생산 마지막 단계에 와서는 감퇴곡선법을 사용하며 궁극 회수율을 얻을 수 있다

① 물질 평형법 (Material Balance Method)

물질평형방정식은 압력 감소로 인하여 팽창된 저류층 유체의 부피와 지상에서 측정된 총 생산량간의 평형관계로 유도된다. 저류층 유체가 생산되면 저류층 압력이 감소하기 시작하는데 이때 저류층 구성물들의 부피팽창으로 매장량을 계산할 수 있다. 물질 평형법의 적용을 위해서는 저류층의 정확한 평균 압력과 석유, 가스, 물의 생산량 자료 및 압력-부피-온도(PVT)에 대한 자료 등이 필요하다.

② 저류층 시뮬레이션(Reservoir Simulation)

저류층 시뮬레이션은 수학적 모델과 수치해석모델로 나뉜다. 수학적 모델(mathematical model)은 실제 생산추이와 계산된 생산추이를 서로 비교하는 방법으로, 이 둘의 적합성 정도에 따라 매장량이 향상 된다. 수치해석 모델(numerical simulation model)은 저류층을 수백개의 작은 셀로 분리하여 각 셀마다 물질평형방정식을 적용하여 컴퓨터로 계산하는 방법이다. 이 방법은 다양한 생산 조건에서 저류층 유체거동을 파악할 수 있으며, 저류층 특성을 고려한 생산최적화 모델을 제시할 수 있는 장점이 있다.

③ 감퇴 곡선법(Production Decline Curves)

지금까지 획득한 충분한 저류층 자료를 통해 유전의 생산량 변화추이를 유추하여 미래의 생산량을 예측하는 방법으로 개발단계에서 마지막에 사용하는 방법이다. 따라서 이때 획득한 값은 가장 높은 신뢰성을 갖고 있으므로, 확인 매장량 혹은 확률론적 방법의 P90과 비슷한 개념으로 볼 수 있다. 우선적으로 일정한 경향의 감퇴곡선 추이를 파악해야 정확한 감퇴곡선을 도출할 수 있기 때문에 장기간 일정한 방법으로 생산하는 것이 중요하다. 그리고 유·가스전의 계속된 생산으로 인해 저류층 압력이 감소하거나 물-가스비, 가스-석유비의 상승 등 여러 요인에 의하여 생산량이 점차 감소하게 되어, 우리가 궁극적으로 알고자 하는 하나의

궁극회수율(EUR)을 얻을 수 있게 되는 것이다. 감퇴 곡선을 도출하는 방법으로는 생산량과 시간의 관계를 도출하는 것이 일반적이거나 수압이 강한 저류층에서는 누적 생산량과 물-석유비의 관계를 도출하여 생산감퇴곡선을 나타낼 수도 있다.

석유 매장량 평가법

석유 매장량 평가법으로는 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 나뉘고, 어떤 경우에는 이 두 방법을 조합하여 최적 매장량을 구하기도 한다.

결정론적 방법(Deterministic Method)

유전의 개발 초기, 저류층 변수를 정확하게 결정하기 힘든 경우에 사용되는 방법으로, 매장량 계산에 사용되는 각 저류층 변수들을 단 하나의 값으로 추정하여 하나의 확정적인 값으로 나타내는 방법이다. 결정론적 방법에 사용되는 매장량 계산식은 용적법에서 기인한다.

최적매장량을 용적법으로 계산한 경우에는 확인매장량(0.8~1.0), 추정매장량(0.4~0.6), 가능매장량(0~0.2)의 계수를 곱하여 그 합을 최적값으로 사용할 수 있다.

$$\text{확인매장량} + \text{추정매장량} + \text{가능매장량} =$$

$$\text{확인매장량} \times (0.8 \sim 1.0) + \text{추정매장량} \times (0.4 \sim 0.6) + \text{가능매장량} \times (0 \sim 0.2)$$

Fig. 3. Calculation of most likely reserve by deterministic method

확인,추정,가능매장량의 분류범주는 개발단계마다 획득된 저류층 자료 증가로 인해 계속 변화한다. 즉, 용적법이 사용될 개발시점에는 매장량의 많은 부분이 추정 및 가능매장량에 속하지만, 물질 평형법을 사용될 시점에는 매장량의 대부분이 확인매장량에 포함될 것이며,

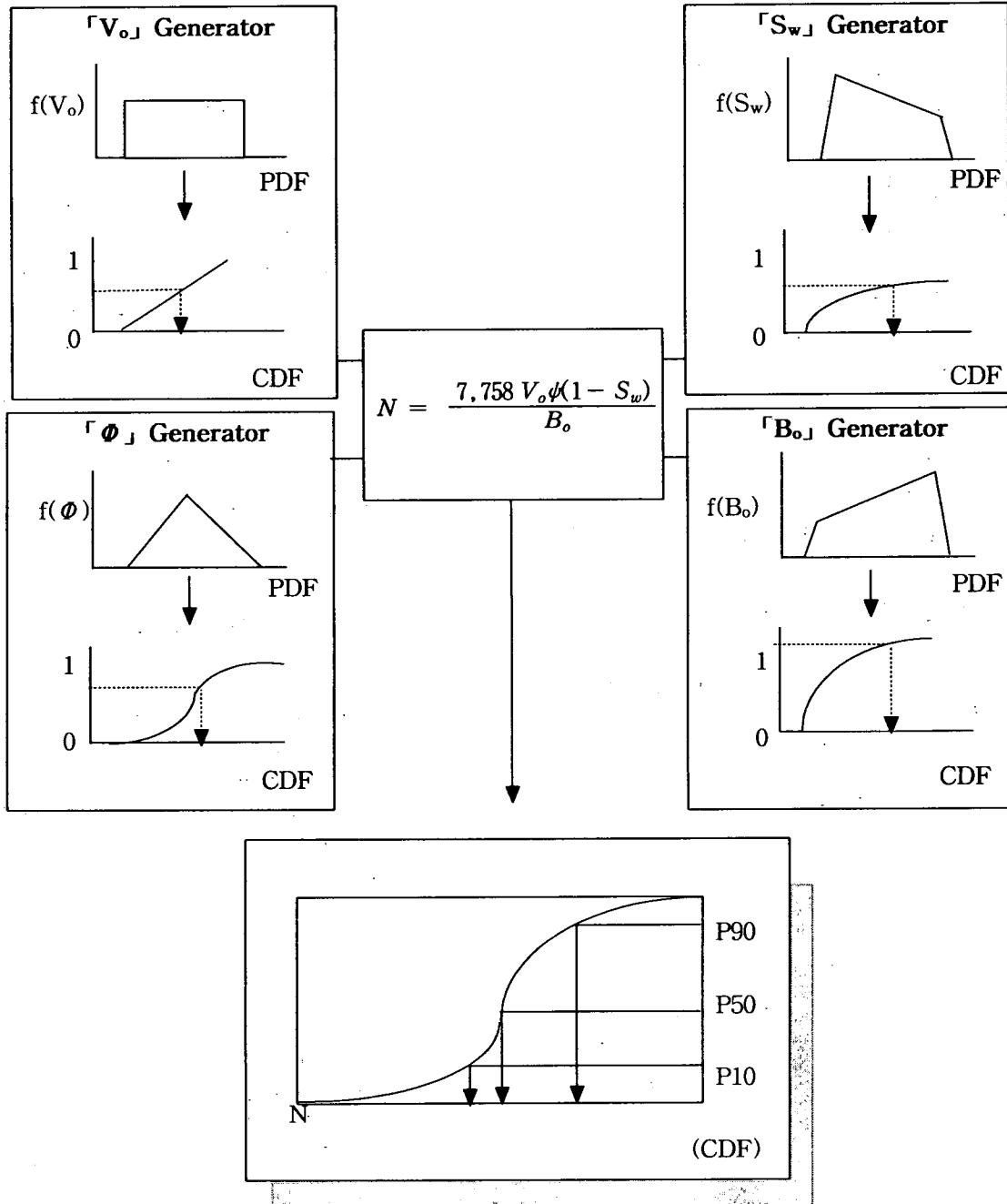


Fig. 4. Schematic procedure for reserve estimation using Monte Carlo Simulation

마지막 감퇴곡선이 적용될 때는 생산의 마지막 단계이므로 거의 모든 매장량이 확인매장량 부분으로만 이뤄지게 되는 것이다.

따라서 최적 매장량을 구성하는 매장량 요소들은 개발 진행단계와 평가 방법에 따라서 차지하는 비중이 다르게 된다.

**확률론적 방법(Probabilistic Method)**

결정론적 방법과는 다르게 각 변수들의 확률분포를 이용해서 구하는 방법이다. 각 변수들이 삼각함수, 정규함수, 로그정규함수 등의 분포를 가지고 있다고 가정하여, 이를 입력변수로 하고 Monte Carlo Simulation 방법을 사용하여 결과값을 산출하게 되는 것이다.

Monte Carlo Simulation이란 랜덤변수, 즉 난수를 사용하는 컴퓨터 프로그램으로서 어떤 모델의 각각 입력 변수들로부터 하나의 값을 확률적으로 추출한 뒤, 이들을 조합하여 다시 확률 분포 형태로 표현해 주는 기법이다.

예를 들어, 저류층에 석유만 있는 경우의 매장량을 확률론적 방법을 통해 평가해보면 다음과 같다.

$$N = \frac{7,758 V_o \phi (1 - S_w)}{B_o} \quad (2)$$

위 식(2)가 구하고자 하는 석유 매장량일 때, 식의 각 변수  $V_o$ ,  $S_w$ ,  $B_o$ ,  $\phi$ 는 서로에 대해 각각 독립적인 확률분포함수(PDF)를 가지고 있다. 각 변수의 PDF를 적분하여 누적분포함수(CDF)로 다시 나타내게 되는데, 이때 난수를 발생시켜 난수에 해당하는 각각 변수들의 값을 추출한다. 이 때 모델에 맞는 가장 알맞은 횟수만큼 반복적으로 난수를 발생시켜준다. 결과적으로 추출하여 얻어진 각 변수값을 (2)식에 대입·조합함으로써 확률분포함수 형태의 결과값을 갖게 된다.

확인, 추정, 가능매장량을 평가하기 위해 계산 결과 얻어진 PDF를 CDF로 변환시켜 P90인 경우는 확인, P50일 때는 추정, P10일 때는

가능매장량으로 분류한다. Fig. 4는 Monte Carlo Simulation을 이용한 확률론적 매장량 계산 방법을 도식적으로 나타낸 것이다.

**결 론**

지금까지 석유 및 천연가스 개발 사업에 있어 필수적인 석유/천연가스 매장량의 정의, 구성체계, 평가방법 등에 대해 간략하게 서술하였다. 이러한 내용들은 국내의 유전개발 사업 참여시 광구에 대한 사업성 평가 및 계획 수립에 활용될 수 있을 것이다. 또한 매장량의 분류 및 평가방법은 현재까지도 계속해서 수정, 보완되고 있으므로 지속적인 관심을 가지고 적극적으로 활용하는데 노력해야할 것이다.

**참고문헌**

1. 유상수 외, 2000, "석유 매장량의 분류체계 및 산출법", 한국자원공학회지 37권 5호 pp. 368-376
2. Garb, F. A., 1985, "Oil and Gas Reserves Classification, Estimation, and Evaluation", *JPT* (March), pp. 361-373
3. Jensen, J.L. et al., 1997, *Statistical for Petroleum Engineers and Geoscientists*, Prentice Hall.
4. Patricelli, J, and McMichael, C.L., 1995, "An Integrated Deterministic / Probabilistic Approach to Reserve Estimations.", *JPT* (January) pp. 49-53
5. SPE/WPC, 1997, "Petroleum Resources Classification and Definition", SPE, <http://www.spe.org>
6. SPE/WPC, 1997 "Petroleum Reserves Definition", <http://www.spe.org>
7. SPE, 2001, "Standards pertaining to the Estimating and Auditing of Oil and Gas Reserve Information", <http://www.spe.org>